

Tema 6. Energía

En los dos temas anteriores has podido comprobar cómo el movimiento y las fuerzas están profundamente relacionados. El enfoque tomado fue estudiar la evolución de los sistemas dinámicos en función del tiempo; sin embargo, ésta no es siempre la manera más útil y sencilla de enfrentarse a un problema mecánico.

Muchas veces **resulta más conveniente estudiar la relación entre las fuerzas que actúan sobre el sistema y los cambios producidos en él por las mismas**. Esta aproximación exige la definición de una nueva magnitud, que llamaremos **energía**, relacionada con la capacidad que tienen los sistemas mecánicos para producir cambios en otros sistemas con los que interaccionan.



En este tema se plantearán las **formas de modificar el contenido energético de un sistema**, mediante trabajo de una fuerza o mediante calor, que se identificarán como energía "en tránsito", estableciendo una relación con conceptos como la potencia y el rendimiento de las máquinas que lo realizan.

Después estudiarás qué se entiende por energía mecánica, su ley de conservación y cuándo puede aplicarse, la diferencia entre fuerzas conservativas y no conservativas, los cambios energéticos producidos en el oscilador armónico y el concepto de potencial electrostático.

Todo ello te permitirá resolver, a partir del estudio de las transferencias de energía producidas, problemas que no podrían ser resueltos de forma sencilla mediante las leyes de la mecánica.

1. ¿Qué es la energía?

Ya has oído hablar de diferentes tipos de energía: la **energía nuclear**, que es la energía que se libera en las reacciones nucleares; la **energía eléctrica**, que suministran las pilas o la red eléctrica, la **energía térmica**, relacionada con la temperatura a la que están los cuerpos, ...

Como sabes, **la energía puede adoptar diferentes formas**, y además **se puede transformar de una forma a otra**. Por ejemplo, la energía eléctrica suministrada a un motor se transforma en energía en movimiento, es decir, energía cinética: cuando el ventilador se conecta a la red eléctrica, las aspas comienzan a girar.

¿Qué es la energía?

Es la capacidad que tiene un cuerpo para interaccionar y producir transformaciones en otros cuerpos o sobre sí mismo.

La energía se mide en **Julios (J)** en el Sistema Internacional.

Características de la energía

Existen distintos tipos de energía, pero todas ellas verifican una serie de características comunes:

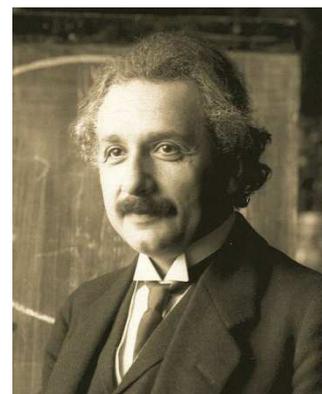
- La energía **se transfiere**. La energía puede pasar de unos cuerpos a otros, y **se transforma** de una forma a otra en el proceso.
- La energía **se conserva** en todos los procesos. Aun cuando la energía se transfiera en un proceso, la cantidad total existente es siempre constante. En otras palabras: "la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma".
- La energía **se degrada**. No toda la energía es igualmente aprovechable: mientras que se puede utilizar prácticamente toda la energía almacenada en una batería para hacer funcionar nuestro teléfono móvil, al quemar unas ramas de madera únicamente una pequeña fracción puede aprovecharse de forma útil. Mientras que muchas formas de energía pueden transformarse íntegramente en energía térmica, **la energía térmica no puede transformarse sino en pequeños porcentajes en otros tipos de energía**. Por ello se puede decir que la energía térmica es un tipo de energía degradada. El estado de degradación de una energía a nivel microscópico tiene que ver con el movimiento ordenado o no de las partículas que componen el sistema: cuanto más ordenado sea, más sencillo será convertir dicha energía en algún tipo útil.

Materia y energía

La física moderna ha demostrado que energía y materia están íntimamente relacionadas; de hecho, ambas son distintas manifestaciones de un mismo concepto, pudiéndose convertir materia en energía y viceversa. Fue Albert Einstein quien estableció la famosa ecuación que las relaciona:

$$E = mc^2$$

en la cual E es la energía, m la masa y c la velocidad de la luz en el vacío, que es constante e igual a 300000 km/s ($3 \cdot 10^8$ m/s).



Una consecuencia de esta relación es la posibilidad de obtener grandes cantidades de energía a partir de los procesos nucleares, como las reacciones de fisión (centrales nucleares) y de fusión (estrellas, bombas nucleares), en las que existe una pérdida de masa muy pequeña que se transforma en una cantidad enorme de energía.

Energía mecánica

La energía se puede presentar de diferentes formas. En primer lugar vas a ver un tipo de energía, llamada **energía mecánica**, que está relacionada, la mayoría de las veces, con máquinas y movimientos.

Esta energía se puede encontrar de dos formas: la **energía potencial gravitatoria**, relacionada con la posición que ocupan los cuerpos, y la **energía cinética**, que tiene que ver con su velocidad.

1.1 Trabajo y energía

En casos simples resulta sencillo predecir el comportamiento del sistema a partir de sus ecuaciones de movimiento y las leyes de Newton. Desgraciadamente, las fuerzas que gobiernan nuestro Universo no son siempre tan sencillas, ya que se trata generalmente de fuerzas cuyo valor depende de la posición; además, los sistemas dinámicos reales están formados por numerosos componentes a los que habría que aplicar este tratamiento, complicando extraordinariamente su resolución.



Para salvar estas dificultades se introduce el concepto de energía, que está relacionada con la capacidad de un sistema dinámico para producir transformaciones en otros cuerpos mediante la transferencia de energía, que puede transmitirse entre los sistemas de dos formas:

- Mediante la realización de **trabajo**.
- Mediante el intercambio de energía calorífica (**calor**).

Al buscar en el diccionario, impreso o en un sitio web, la palabra trabajo obtendrás distintas acepciones, tales como "*acción y efecto de trabajar*", "*esfuerzo humano aplicado a la producción de riqueza*" o "*dificultad, impedimento*". El concepto físico de trabajo, aunque parecido, no se corresponde exactamente con esta definición, ya que en el lenguaje suele confundirse el hecho de realizar un esfuerzo con hacer un trabajo.

De hecho, para que una fuerza realice un trabajo es necesario que produzca algún tipo de transformación mecánica, y ésta siempre lleva asociada un desplazamiento. Por lo tanto, es **necesario que exista un desplazamiento para poder hablar de trabajo**.

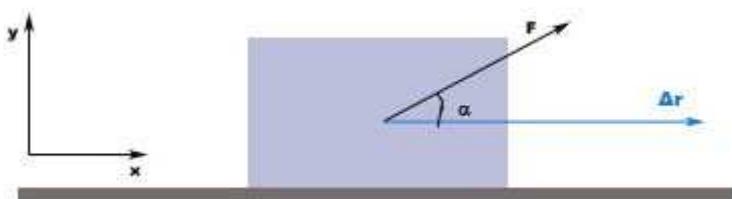
Trabajo y energía

Históricamente, se comienza a hablar de energía por parte del físico inglés T. Young a principios del siglo XIX como la capacidad de un sistema para realizar un trabajo. Esta definición se realiza a partir de los experimentos de este científico que demostraron que, cuando se realizaba un trabajo mecánico sobre un sistema, la energía del mismo aumentaba.

Así, cuando un objeto era capaz de realizar trabajo, contenía energía. Esta relación entre trabajo y energía implicaba que se trataba de la misma magnitud, y que por tanto debía medirse en las mismas unidades. Pero pronto se comprobó que un sistema no ganaba ni perdía energía únicamente mediante la realización de un trabajo mecánico, sino que también podía hacerlo a través de intercambios de calor con el entorno, por lo que unas décadas después el alemán H. Helmholtz definió la energía como "**Una propiedad que se manifiesta en las transformaciones que ocurren en la naturaleza**".

Definición de trabajo

Para definir matemáticamente el trabajo se necesita una fuerza F que actúe sobre un cuerpo produciendo un desplazamiento de su punto de aplicación Δr . La situación más sencilla es cuando la fuerza F es constante y el objeto se desplaza en línea recta sobre una superficie horizontal. En el caso general de que la dirección de la fuerza forme un ángulo α respecto a la dirección de desplazamiento, el esquema de la situación será tal y como se representa en la imagen.



Debido a que únicamente la componente de la fuerza que provoca movimiento realiza trabajo -en este caso es la componente sobre el eje x , $F_x = F \cos \alpha$ -, el trabajo mecánico realizado dependerá sólo de ella y podremos enunciar la definición de trabajo mecánico.

$$W = F \Delta r \cos \alpha$$

De la definición anterior puede deducirse que:

- Cuando la componente sobre el eje x de la fuerza aplicada tiene la misma dirección y sentido que el desplazamiento (ayuda al movimiento, acelera) o el ángulo entre la fuerza F y la dirección y sentido del desplazamiento es menor que 90° (por lo tanto $\cos \alpha > 0$), el trabajo es positivo ($W > 0$).
- Si la componente sobre el eje x de la fuerza aplicada tiene igual dirección pero sentido contrario al desplazamiento (se opone al movimiento, frena) o el ángulo entre la fuerza F y la dirección y sentido del desplazamiento es mayor que 90° (por lo tanto $\cos \alpha < 0$), el trabajo es negativo ($W < 0$).
- Cuando la fuerza es perpendicular al desplazamiento $\alpha = 90^\circ$, entonces $\cos \alpha = 0$ y $W = 0$. Por lo tanto, **una fuerza perpendicular al movimiento no realiza trabajo**.

Si el **trabajo es positivo** (se realiza sobre el sistema) sirve para **aumentar su energía**, mientras que si es negativo porque la fuerza se opone al desplazamiento, hace disminuir la energía del sistema.

Trabajo mecánico

Se denomina **trabajo mecánico (W)** realizado por una fuerza F que actúa sobre un cuerpo, al producto escalar de la fuerza (F) por el desplazamiento (Δr) experimentado.

$$W = \vec{F} \cdot \Delta \vec{r} = F \Delta r \cos \alpha = F_x \Delta r$$

La unidad de trabajo en el Sistema Internacional es el **Julio (J)**, definida como el trabajo realizado por una fuerza de 1 N cuando su punto de aplicación se desplaza 1 m en la misma dirección y sentido que la propia fuerza ($1 \text{ J} = 1 \text{ N m}$).

El trabajo no es una forma de energía, sino un método de transferir energía. Por esa misma razón no se puede hablar del trabajo contenido en un sistema.

El trabajo de varias fuerzas

Cuando sobre un cuerpo actúa más de una fuerza de forma simultánea, el trabajo realizado por la fuerza resultante, suma vectorial de todas ellas, es igual a la suma de los trabajos realizados por cada una de ellas por separado.

1.2 Calor y energía

Cuando se ponen en contacto dos cuerpos que se encuentran a distinta temperatura, se produce una transferencia de energía desde el cuerpo más caliente al más frío, de forma que el primero se enfría mientras que el segundo se calienta hasta que ambos alcanzan la misma temperatura. Esta transferencia se realiza entre sistemas sin que exista trabajo realizado.

Definición de calor

Se denomina **calor (Q)** al proceso de transferencia de energía entre dos sistemas a diferente temperatura sin que se realice ningún trabajo.

Conductividad térmica y sensación de frío o de calor

El concepto de calor como energía en movimiento permite explicar qué es lo que ocurre cuando se ponen en contacto dos sistemas que tienen distinta temperatura hasta que se alcanza la situación de equilibrio térmico.

Al entrar en contacto estos sistemas, se produce un intercambio de energía en forma de calor desde el sistema más caliente hasta el más frío, hasta que las temperaturas se igualan. Esto no quiere decir que en ese momento cese todo intercambio de calor -de hecho están produciéndose continuamente- sino que en promedio la energía intercambiada entre los sistemas es la misma, por lo que no se produce variación en la temperatura.

Cuando un sistema está en equilibrio térmico, todas sus partes tienen la misma temperatura; ahora prueba a tocar con una mano la mesa o un libro que tengas cerca y con la otra cualquier objeto metálico. ¿Cuál de los dos está más caliente?

Ambos están a la misma temperatura, pero entonces ¿por qué parece que el metal está más frío? La respuesta tiene que ver con una propiedad de la materia: la **conductividad térmica**. No todos los materiales conducen igual de bien el calor; concretamente, los metales conducen muy bien el calor y, por ello, el calor fluye rápidamente de nuestra mano al objeto metálico, y este calor extraído de nuestro cuerpo es lo que nos da la sensación de frío. La madera o el papel son malos conductores, y por ello el calor fluye más lentamente y parecen más calientes.



Pero el calor no se transmite únicamente mediante conducción, sino que existen otros mecanismos que ya conoces: la convección y la radiación.

Unidades de calor

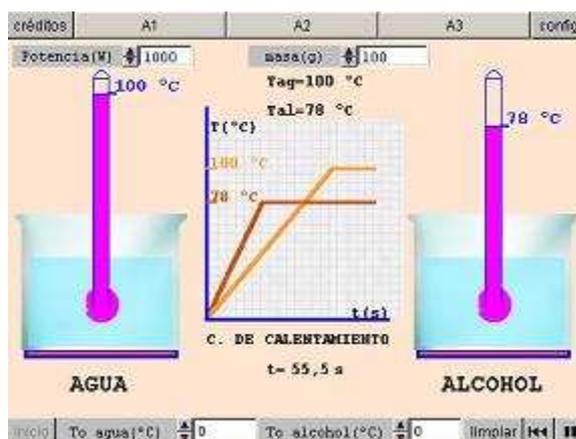
El calor se mide en el S.I. en **julios (J)**, pero también en **calorías (cal)**. Una caloría se define como la energía necesaria para elevar un grado la temperatura de un gramo de agua. La relación entre julio y caloría es $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$.

Calor y cambios de temperatura

Una experiencia clásica consiste en comunicar la misma cantidad de calor a dos recipientes que contienen igual masa de alcohol y agua.

Fíjate en la gráfica de la imagen: observa que el alcohol aumenta significativamente más rápido su temperatura, hasta que alcanza su temperatura de ebullición ($78 \text{ }^\circ\text{C}$), momento en el que cesa de aumentar. Lo mismo sucede con el agua, que se calienta más lentamente y tiene un punto de ebullición más alto.

Por tanto, es necesario introducir una nueva magnitud que exprese el diferente comportamiento de las sustancias al ser calentadas.



Si se transfiere una misma cantidad de calor a dos sistemas distintos, el aumento de temperatura experimentado por cada uno de ellos no es siempre el mismo, sino que depende de su naturaleza y composición. El parámetro que relaciona el incremento de la temperatura con el calor suministrado se denomina **calor específico (c_e)** de una sustancia, definido como la energía necesaria para calentar un kilogramo de una sustancia y elevar su temperatura un Kelvin o un grado Celsius. Es característico de cada sustancia y se mide en el S.I. en $\text{J}/(\text{kg K})$.

Ecuación de la calorimetría

La energía transferida a un cuerpo de masa m para que su temperatura pase de una inicial (T_i) a otra final (T_f) viene dada por la expresión:

$$Q = m c_e (T_f - T_i)$$

donde c_e es el **calor específico** de la sustancia.

Debido a que aparece una diferencia de temperaturas, se puede utilizar la escala Kelvin o la Celsius, ya que las dos son centígradas.

Calor y cambios de estado

Aparte del lógico aumento de la temperatura en los cuerpos, cuando se calienta un cuerpo pueden producirse cambios de estado. Al comunicar energía a una sustancia, según la teoría cinética de la materia aumenta la energía cinética de sus partículas, de forma que comienzan a moverse más rápidamente, siendo más probable que adquieran la energía necesaria como para vencer las fuerzas que las mantienen unidas, cambiando su configuración.

Cuando se calienta un sólido, las partículas que se encuentran en posiciones prácticamente fijas comienzan a vibrar con mayor amplitud y velocidad, hasta que se funde. Al alcanzar el punto de energía cinética máxima, la energía adicional se emplea en vencer las fuerzas que mantienen las partículas unidas entre sí, abandonando sus posiciones y pasando al estado líquido.



En este proceso de cambio de estado se produce un intercambio de calor, positivo en el caso de paso de sólido a líquido y negativo pero de igual valor que el anterior en el paso de líquido a sólido, que se utiliza en romper las uniones que mantienen unidas las partículas.

Calor latente de cambio de estado

Se denomina **calor latente (L)** a la energía intercambiada para producir el cambio de estado de un kilogramo de materia a temperatura constante (temperatura de cambio de estado):

$$Q = m L$$

El calor latente se mide en **J/kg**.

1.3 Potencia y energía

Cuando se compra un automóvil, uno de los factores que se tienen en cuenta para su elección es la potencia de su motor, que condiciona tanto su uso (arrastre de remolques, facilidad en los adelantamientos, etc...) como su coste (los impuestos varían en función de la potencia fiscal, directamente relacionada con ésta). En las competiciones del motor, la mayor parte de las veces las diferencias de potencia entre los vehículos participantes marcan la diferencia en el resultado de la carrera. Pero, ¿qué se entiende por potencia?



Para cualquier máquina en general no sólo es importante que pueda realizar un determinado trabajo sino que además éste debe poder realizarse en el mínimo tiempo posible. En otras palabras, casi resulta más importante conocer la rapidez con la que se transfiere la energía que la magnitud de ésta.

La potencia se introduce para poder **comparar la rapidez con la que las máquinas realizan un mismo trabajo**; así, un motor más potente será capaz de acelerar más rápidamente un vehículo que otro menos potente y será por tanto considerado más eficaz.

Definición y unidades de potencia

La magnitud que mide la rapidez con que se transfiere la energía se denomina **potencia (P)**.

La potencia se define como el trabajo realizado por unidad de tiempo:

$$P = \frac{W}{t}$$

La unidad de potencia en el Sistema Internacional es el **vatio (W)**, correspondiente a la realización del trabajo de un Julio en un segundo.

Dado que el vatio es una unidad demasiado pequeña como para resultar útil para expresar potencias habituales, se utilizan múltiplos de la misma, como el kilovatio (1 kW = 1000 W) o el megavatio (1 MW = 10⁶ W).

Otra unidad de uso habitual en motores es el caballo de vapor (CV), siendo la equivalencia 1 CV = 735 W.

Potencia y velocidad

Existe una forma alternativa de escribir la potencia en función de la velocidad. Para calcularla, basta recordar cómo se definieron las magnitudes trabajo ($W = F \Delta r$) y velocidad ($v = \Delta r/t$) y operar sobre la definición de potencia:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{\vec{F} \cdot \Delta\vec{r}}{t} = \vec{F} \cdot \frac{\Delta\vec{r}}{t} = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

Esta relación es válida para cualquier objeto en movimiento, y se reduce a **P=Fv** si la fuerza y la velocidad son de la misma dirección y sentido.

¿El kw/h?

El consumo eléctrico que aparece en la factura que nos envía la compañía eléctrica todos los meses se indica en kilovatios-hora (kWh).

Un error que se comete habitualmente es referirse a este dato como la potencia consumida (¿?), cuando realmente se trata de una medida de la energía consumida.

El kilovatio-hora también es una unidad de trabajo, cuya equivalencia en julios puede calcularse fácilmente:

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Ws} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

2. Energía mecánica

La energía se puede presentar de diferentes formas. Una de ellas, la **energía mecánica** está relacionada con máquinas y movimientos.

Esta energía mecánica se puede encontrar de dos formas: la **energía potencial gravitatoria**, relacionada con la posición que ocupan los cuerpos, y la **energía cinética**, que tiene que ver con su velocidad.

Definición de energía mecánica

Se define la energía mecánica de un sistema como la suma de las energías cinética y potencial de las partículas que lo componen.

Energía cinética

Un cohete despegando, un automóvil moviéndose, una bala recién disparada o una manzana cayendo tienen energía cinética. Y, naturalmente, ¡también las vagonetas de las montañas rusas!

La energía cinética es la forma de energía asociada a la velocidad de un cuerpo. Según esto, **todo cuerpo en movimiento tiene energía cinética**, y esta energía puede ser transferida, tal y como se manifiesta cuando se produce algún cambio en el estado de movimiento del sistema que la posee. Al interactuar con otro



cuerpo en reposo, el sistema en movimiento pierde velocidad pudiendo transferir movimiento a otro cuerpo o bien producir transformaciones en él.

Definición de energía cinética

Puede definirse la energía cinética de un cuerpo como:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

donde **m** es la masa del cuerpo y **v** la velocidad a la que se mueve.

Puede observarse que la energía cinética depende del valor de la masa y, sobre todo, del cuadrado del valor de su velocidad. Esto tiene importantes consecuencias, y explica, por ejemplo, por qué la gravedad de los accidentes de tráfico aumenta rápidamente con la velocidad.

Tipos de energía potencial

En general, un cuerpo tiene energía potencial si puede realizar trabajo al cambiar de posición. A diferencia de la energía cinética, que era de un único tipo, existen distintos tipos de energía potencial:

- Energía potencial **gravitatoria**, que es la que tiene un cuerpo por encontrarse bajo la influencia de un campo gravitatorio (en nuestro caso el terrestre), siendo la fuerza de la gravedad la que realiza un trabajo sobre el cuerpo.
- Energía potencial **elástica**, asociada a la fuerza recuperadora de un muelle o dispositivo similar al deformarse.
- Energía potencial **eléctrica**, que es la que tiene un cuerpo con carga eléctrica por encontrarse bajo la influencia de un campo eléctrico, siendo la fuerza eléctrica del campo la que realiza trabajo sobre el cuerpo cargado.

Las energías potenciales **química** o **nuclear** se manifiestan de forma diferente, y no se van a considerar en este momento.

Energía potencial gravitatoria

Un cuerpo tiene energía potencial gravitatoria por el hecho de estar a una determinada distancia del centro de la Tierra (a una altura concreta sobre su superficie).

Piensa en que para elevar un cuerpo y separarlo del centro de la Tierra hace falta aportar energía y sólo hay que dejarlo caer para ver que esta energía "almacenada" puede transformarse en energía cinética.



Siempre se cumple que **cuando un sistema se encuentra aislado del entorno, tiende de forma espontánea a ocupar la posición de mínima energía potencial gravitatoria posible.**

Definición de energía potencial gravitatoria

La energía potencial gravitatoria de un cuerpo en la superficie de la Tierra viene dada por la expresión:

$$E_p = mgh$$

donde m es la masa del cuerpo, g es la aceleración de la gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$) y h la altura a la que se encuentra el cuerpo con respecto a una altura que se considera cero.

2.1 Energía cinética, energía potencial y trabajo

Energía cinética y trabajo

Como el trabajo realizado sobre un cuerpo modifica su velocidad, es posible relacionar trabajo y energía cinética: dado un **cuerpo de masa m** que se desplaza por una superficie horizontal sin rozamiento, sobre el que se aplica una **fuerza constante F** en el mismo sentido de desplazamiento, tenemos que:

- Según la ecuación del trabajo: $W = \vec{F}\Delta\vec{r} = F\Delta r$ (1)

- Según la segunda ley de Newton: $F = ma \Rightarrow a = \frac{F}{m}$ (2)

- Despejando el tiempo en la ecuación de la velocidad y sustituyéndolo en la de la posición del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado

$$x = x_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2$$

$$v = v_0 + at$$

$$v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0) = 2a\Delta r$$

$$v_f^2 - v_i^2 = 2a\Delta r \quad (3)$$

Ten en cuenta que la velocidad final v_f es v , y la inicial v_i es v_0 .

Despejando la aceleración expresada en la ecuación (2) en la última ecuación (3) obtenemos:

$$v_f^2 - v_i^2 = 2\frac{F}{m}\Delta r \Rightarrow F\Delta r = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2$$

y sustituyendo el trabajo por su expresión (1), se obtiene:

$$W = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2$$

Según la definición dada para la energía cinética y la relación obtenida con el trabajo, puede escribirse:

$$W = E_{cf} - E_{ci}$$

Es posible generalizar la expresión obtenida para cualquier conjunto de fuerzas que actúan sobre un cuerpo, obteniendo lo que se conoce como **teorema de las fuerzas vivas** o **de la energía cinética**.

Teorema de las fuerzas vivas

La suma del trabajo realizado por las fuerzas que actúan sobre un cuerpo (o trabajo de la fuerza resultante) es igual a la variación experimentada por su energía cinética.

$$W_{total} = \Delta E_c = E_{c_{final}} - E_{c_{inicial}}$$

- Si se realiza trabajo sobre el cuerpo, $W > 0$, la variación de energía cinética experimentada es positiva y el cuerpo aumenta su energía cinética.
- Si el cuerpo realiza trabajo sobre su entorno, $W < 0$, la variación de energía cinética experimentada es negativa y el cuerpo disminuye su energía cinética.

Energía potencial gravitatoria y trabajo

Al igual que ocurre en el caso de la energía cinética, es posible encontrar una relación entre el trabajo realizado por una fuerza y la variación en la energía potencial gravitatoria. Si suponemos el caso particular de la elevación de un objeto, para conseguirlo hay que aplicar una fuerza de intensidad igual al peso (mg) pero hacia arriba, durante la distancia que está ascendiendo el cuerpo ($h_f - h_0$):

$$W = Fd = mg(h_f - h_0) = mgh_f - mgh_0$$

$$W = E_{p_f} - E_{p_0} = \Delta E_p$$



Se observa que **el trabajo realizado por la fuerza exterior es igual a la variación de la energía potencial gravitatoria del cuerpo en su desplazamiento**.

Hay que destacar que como el trabajo viene dado por la diferencia de posiciones (alturas), **es posible escoger arbitrariamente un nivel de referencia a partir del que calcular las alturas**. Generalmente se toma el nivel del suelo como referencia, pero puede tomarse cualquier otro sin ningún problema si así conviene por las condiciones de la situación que se está analizando.

Potencial gravitatorio

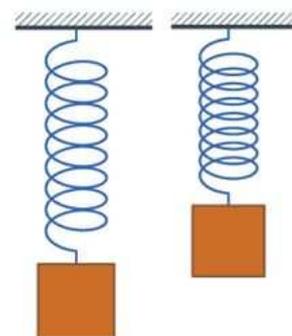
Se define como la energía potencial que tiene la unidad de masa, y que cerca de la superficie de la Tierra tiene un valor de:

$$V_g = \frac{mgh}{m} = gh$$

2.2 Fuerzas conservativas y no conservativas

Desde los comienzos de la ciencia se ha buscado lo que se conoce como "*móvil perpetuo*", una máquina o dispositivo que permanezca indefinidamente en su estado de movimiento sin necesidad de un aporte externo de energía.

Su descubrimiento supondría la esperanza de obtener una fuente inagotable de energía. Desgraciadamente, hoy en día sabemos que la existencia de este tipo de dispositivos es imposible, pues en el mundo real existen fuerzas, denominadas **disipativas** o **no conservativas**, cuyo trabajo transforma la energía mecánica en otros tipos de energías más degradadas y por tanto menos útiles, provocando que la energía mecánica del sistema vaya disminuyendo y finalmente se agote.



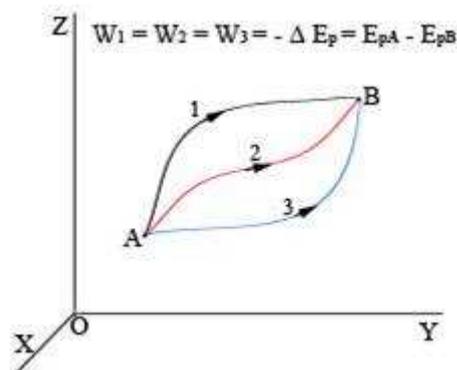
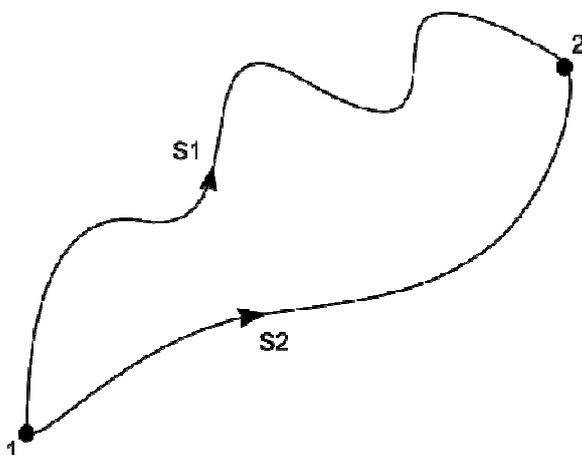
Puedes observar el efecto de una fuerza disipativa en la oscilación de un muelle.

Fíjate en que mientras las oscilaciones del muelle de la izquierda son constantes, el de la derecha va amortiguándose. El primero corresponde a un movimiento ideal sin rozamiento, en el que se conserva la energía mecánica, mientras que en el caso del segundo actúa una fuerza no conservativa que provoca que su energía mecánica vaya disminuyendo.

Las **fuerzas de rozamiento son un ejemplo de fuerzas no conservativas**, y son las que provocan que, por ejemplo, la vagoneta desplazándose en la montaña rusa no siga moviéndose indefinidamente y sea necesario el trabajo de un motor para devolverla a su posición inicial. El trabajo realizado por estas fuerzas (negativo siempre por oponerse éstas al movimiento) hace disminuir la energía mecánica, que se transforma en energía térmica, pero conservándose la cantidad total de energía.

Energía potencial y fuerzas conservativas

Se dice que una fuerza es conservativa cuando es nulo el trabajo que realiza sobre un cuerpo que describe una trayectoria cerrada. Equivale a decir que el trabajo realizado por la fuerza entre dos puntos cualesquiera es independiente de la trayectoria, y solamente depende de cuáles son esos puntos, de la posición inicial y final.



También se dice que una fuerza es conservativa cuando su trabajo se puede evaluar como la diferencia entre los valores que adopta una cierta función, llamada energía potencial, calculada en los puntos inicial y final.

$$W_{Fc} = E_{potencial}(A) - E_{potencial}(B) = -\Delta E_{potencial}$$

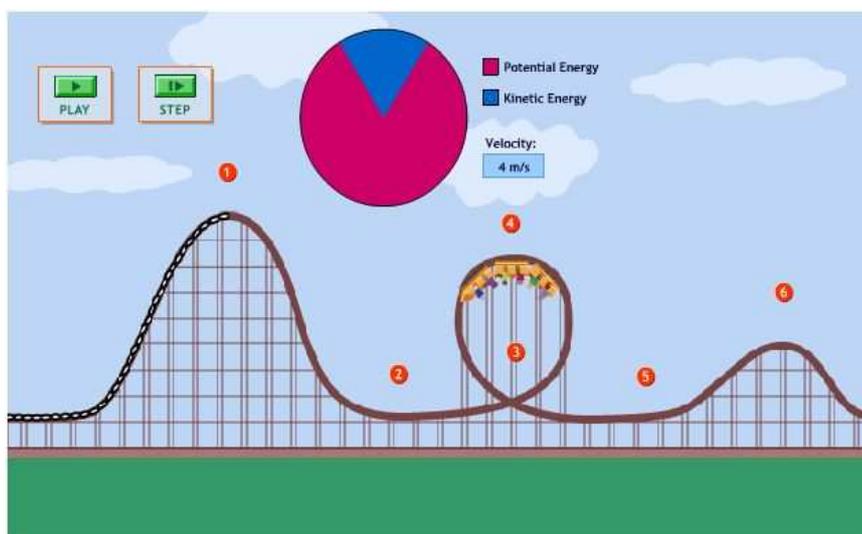
3. Principio de conservación de la energía

Energía mecánica en la montaña rusa

La expresión desarrollada de la energía mecánica resulta ser:

$$E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2}mv^2 + mgh$$

Observa la siguiente simulación, que reproduce el movimiento de una vagoneta en una montaña rusa. Puedes realizar el trayecto completo con el botón *PLAY* o bien paso a paso con el botón *STEP*:



Puedes ver cómo la energía aumenta en el primer trayecto de subida (etapa 1) y desde allí permanece constante, cambiando, eso sí, de tipo, entre el máximo de energía potencial (1) y el máximo de cinética (2), y con puntos intermedios (3), (4), (5) y (6) en los que coexisten ambos tipos de energía, siendo su suma constante e igual a la energía mecánica total del sistema.

En una montaña rusa típica, como la que puedes ver en el parque de Wonderland (Toronto), la vagoneta asciende mediante una cremallera hasta el punto de máxima elevación y, a partir de allí, se deja que describa el circuito sin necesidad de aplicar ningún trabajo sobre ella. En el transcurso de su viaje, puede observarse cómo la velocidad aumenta al descender, disminuyendo al ascender, de forma que la máxima velocidad se presenta en el punto de menor altitud.



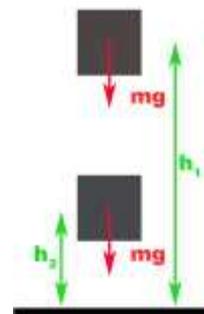
Este comportamiento puede explicarse en términos energéticos como una conversión entre las dos componentes de la energía mecánica: cinética y potencial. Así, en el punto más alto de la trayectoria, su energía cinética es cero y toda la energía mecánica está almacenada en forma de energía potencial. Conforme descende, disminuye la energía potencial y aumenta la energía cinética, al ir adquiriendo progresivamente velocidad. En el punto más bajo de la trayectoria, toda su energía mecánica está almacenada como energía cinética.

Si no existieran rozamientos, la vagoneta continuaría indefinidamente su movimiento, ya que no existirían pérdidas energéticas. En la vida cotidiana esto no es cierto, pero al idealizar la situación nos permite solucionar problemas complejos con gran facilidad.

Conservación de la energía mecánica

Cuando **una magnitud permanece constante**, se dice que dicha magnitud **se conserva**. Este es el caso de la energía mecánica.

Para comprobarlo, fíjate en el caso de un cuerpo en caída libre desde la posición 1 a la posición 2, despreciando el rozamiento con el aire. La única fuerza que actúa sobre el cuerpo es su peso, y al caer su energía potencial gravitatoria disminuye al ser menor la altura; es decir, el trabajo realizado por el peso hace disminuir la energía potencial gravitatoria del cuerpo. Pero como el trabajo es positivo (peso y desplazamiento van los dos hacia abajo, en la misma dirección y sentido) y la variación de energía potencial es negativa:



$$W_{1 \rightarrow 2} = -\Delta E_p = -(E_{p2} - E_{p1}) = E_{p1} - E_{p2}$$

Fíjate en que el signo negativo proviene de que el trabajo realizado por la interacción gravitatoria disminuye la energía potencial del cuerpo. Es decir, **la fuerza gravitatoria es conservativa**.

Pero, por otro lado, al caer el cuerpo va aumentando su energía cinética. Según el teorema de las fuerzas vivas, se puede afirmar que:

$$W_{1 \rightarrow 2} = \Delta E_c$$

Conservación de la energía mecánica

Si sobre un sistema actúan solamente fuerzas conservativas su energía mecánica permanece constante: si no existe rozamiento, no existe la pérdida de la energía necesaria para vencerlo.

Por ser una fuerza: $W = \Delta E_c$

Por ser una fuerza conservativa: $W = -\Delta E_p$

$$\Delta E_c = -\Delta E_p; \quad \Delta E_c + \Delta E_p = 0; \quad \Delta E_m = 0$$

3.1 Principio general de conservación de la energía

Es posible obtener una expresión matemática para el principio de conservación de la energía como extensión del de la energía mecánica, teniendo en cuenta que se puede agrupar todas las fuerzas en una de las dos categorías: conservativas y no conservativas.

$$F = F_c + F_{nc} \Rightarrow W_F = W_{Fc} + W_{Fnc}$$

$$W_F = \Delta E_c; \quad W_{Fnc} = -\Delta E_p$$

$$\Delta E_c = -\Delta E_p + W_{Fnc}$$

$$W_{Fnc} = \Delta E_c + \Delta E_p = \Delta E_m$$

Trabajo de las fuerzas no conservativas y variación de energía mecánica

Cuando sobre un sistema aislado actúan tanto fuerzas conservativas como no conservativas, se verifica que la variación de la energía mecánica es igual al trabajo realizado sobre el mismo por las fuerzas no conservativas.

$$\Delta E_m = W_{nc}$$

En el caso de fuerzas de rozamiento, como éstas se oponen al movimiento, el trabajo será negativo y se producirá una disminución de la energía mecánica.

Asimismo, si no existen fuerzas no conservativas, su trabajo será nulo y el incremento de la energía mecánica valdrá cero, lo que muestra que esta expresión es más general que el principio de conservación de la energía mecánica.

3.2 Rendimiento de una máquina

En los casos ideales no se producían pérdidas de energía, pero en las máquinas reales la transformación de la energía consumida no se realiza de forma íntegra en trabajo útil. Esto se debe, sobre todo, a la existencia de fuerzas de rozamiento, ya sea entre las partes constituyentes de la máquina o con el ambiente que la rodea (fuerzas no conservativas).

Dado que se trata de **pérdidas energéticas**, se verificará siempre que **el trabajo útil será menor que la energía suministrada**, y esta energía disipada lo hará en forma de calor.

Como a partir de la energía térmica en que se transforman las pérdidas energéticas es más difícil obtener energía, **se pierde calidad de la energía** en este tipo de procesos: aunque se conserva la cantidad, se degrada y se transforma en energía poco útil.

Rendimiento de una máquina

Se denomina **rendimiento (η)** de una máquina al cociente entre el trabajo útil que proporciona y la energía que se le ha suministrado y consumido. Este rendimiento suele expresarse en tanto por ciento:

$$\eta = \frac{\text{trabajo útil}}{\text{energía consumida}} \cdot 100$$

Análogamente es posible expresarlo como la relación entre la potencia útil y la potencia teórica de la máquina:

$$\eta = \frac{\text{potencia útil}}{\text{potencia teórica}} \cdot 100$$

Dado que la energía suministrada siempre será mayor que el trabajo útil obtenido, el rendimiento siempre será menor del 100% y su valor estará comprendido entre 0% (cuando toda la energía sea disipada y no se obtenga ningún trabajo) y 100% (si la conversión es total y toda la energía se transforma en trabajo).

En la vida real una máquina que realice trabajo con un rendimiento del 100% no es posible, pues siempre se producen pérdidas por disipación de calor.

Observa la siguiente animación en la que se explica el rendimiento en un proceso tan simple como elevar un cubo de agua de un pozo.

3.3 Calor y trabajo

Hay dos formas de aumentar o disminuir la energía de un sistema:

1. Mediante la realización de un trabajo (W)

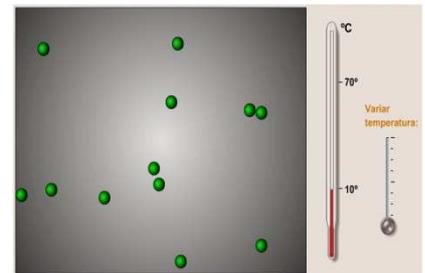
Fíjate en la jeringuilla clínica de la imagen, a la que se ha obturado la boca para que no pueda escapar el gas contenido en su interior. Si ahora empujas el émbolo presionando, el gas se comprime. El sistema termodinámico ha cambiado sus variables, ahora la presión es mayor y el volumen es menor. De hecho, la energía del sistema ha aumentado, como podemos comprobar si dejamos en libertad el émbolo, momento en el que se desplazará en sentido contrario hasta recuperar su posición inicial. La situación es similar a la compresión de un muelle.



2. Mediante el intercambio de calor (Q)

Otra forma más común para intercambiar energía entre sistemas es a través de su calentamiento: cuando se ponen en contacto dos sistemas a diferente temperatura se produce una transferencia de energía en forma de calor del cuerpo más caliente hacia el más frío. Este mecanismo es el utilizado para cocinar o calentar una habitación. También en el proceso de cambio de estado debe transferirse calor para que éste se produzca.

Cuando se transfiere energía en forma de calor, éste se transmite en forma de choques a escala de partículas, provocando, como ya sabes, el movimiento desordenado de las partículas del sistema. Fíjate en lo que sucede al calentar un gas.



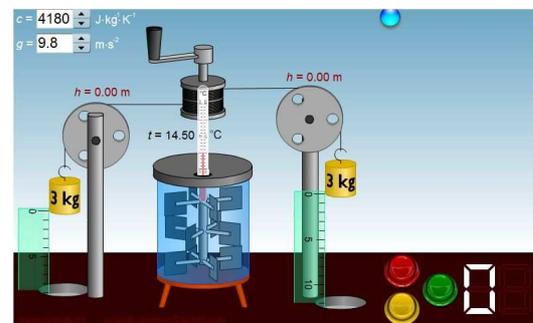
Intercambio de energía entre sistemas

Puede realizarse de dos formas:

- En forma de **trabajo** cuando alguna fuerza provoca un desplazamiento.
- En forma de **calor** cuando existe diferencia de temperaturas o se produce un cambio de estado.

Equivalente mecánico del calor

La transferencia de energía de una u otra forma es equivalente, tal y como demostró a mediados del siglo XIX el inglés J. Joule, demostrando en su experiencia que la realización de un trabajo podía aumentar la temperatura de un sistema térmicamente aislado en su famoso experimento, que puedes simular en el siguiente experimento.



En ella se transforma la variación de la energía potencial de las masas al caer en trabajo de rotación de una pala, que a su vez la transmite al sistema como movimiento de sus partículas y el consiguiente incremento de temperatura.

La caloría y el julio

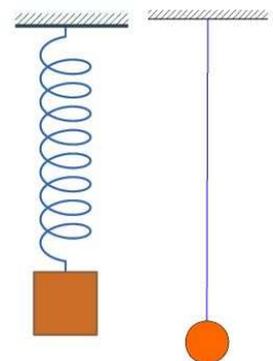
Mediante el experimento de Joule se demuestra que se transfiere una energía de una caloría por cada 4,18 julios de variación de energía mecánica, que sirve para aumentar la temperatura del sistema.

$$1 \text{ caloría} = 4,18 \text{ julios}$$

4. Energía en el oscilador armónico

¿Qué es un oscilador armónico? Se trata simplemente de un mecanismo que se mueve realizando oscilaciones entre dos puntos cada cierto tiempo fijo (periodo T), repitiendo las características de su movimiento (posición, velocidad, aceleración, energía potencial gravitatoria y energía cinética).

Los dos ejemplos más típicos son un muelle que oscila o un péndulo.

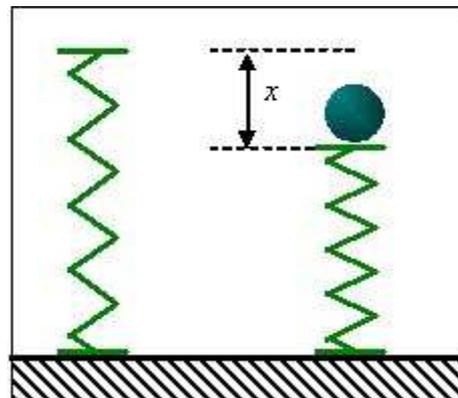


Energía potencial elástica

Al comprimir o alargar un muelle se realiza trabajo, que se transforma y queda almacenado en el mismo en forma de energía potencial elástica.

Al igual que ocurría con la energía potencial gravitatoria, el trabajo coincide con el trabajo mecánico necesario para deformar el muelle de la posición inicial de equilibrio a la final, lo que se conoce como elongación del muelle.

Para deformar el muelle es necesario realizar una fuerza F de igual dirección y sentido contrario a la fuerza de restitución del mismo peso (que viene dada por la ley de Hooke que ya estudiaste $F=kx$).



Cuando se realiza fuerza sobre un muelle, comprimiéndolo o estirándolo, se almacena energía en él, ya que al soltarlo tiende a recuperar su situación inicial. Esa energía se llama potencial elástica.

Energía potencial elástica

La energía potencial elástica almacenada en un muelle o resorte toma el valor:

$$E_{pe} = \frac{1}{2}kx^2$$

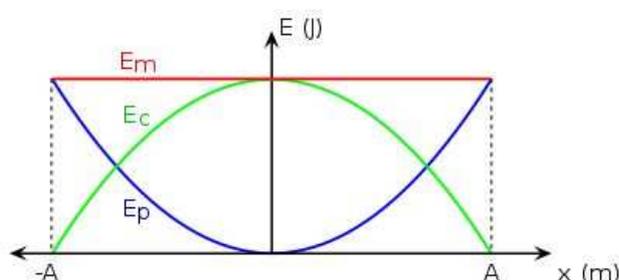
donde k es la constante elástica del muelle y x la elongación (deformación) del mismo.

Energía mecánica en el oscilador lineal

Si observas la oscilación del muelle, verás que cuando el bloque que oscila se encuentra en las posiciones de máximo estiramiento o compresión (amplitud de oscilación, A), el bloque se para instantáneamente, con lo cual su energía cinética es nula. Pero en esos momentos su energía potencial es máxima, ya que la elongación x también lo es.

La fuerza restauradora es conservativa, por lo que se conserva la energía mecánica. Fíjate en la gráfica siguiente, en la que se representan los valores de las energías potencial, cinética y mecánica durante la oscilación.

Puedes observar que la energía potencial (línea azul) es máxima en los extremos de la oscilación y mínima en el punto de equilibrio, mientras que los valores de la energía cinética varían justo al revés (línea verde), ya que el muelle se para justo en los extremos, y es en el centro donde se mueve más rápidamente.



Pero la energía mecánica total es constante (línea roja), ya que no hay pérdidas energéticas de ningún tipo.

Las expresiones de los tres tipos de energía son:

$$E_{potencial} = \frac{1}{2}kx^2$$

$$E_{cinetica} = \frac{1}{2}k(A^2 - x^2)$$

$$E_{mecanica} = \frac{1}{2}kA^2$$

donde k es la constante elástica, x la elongación (separación de la posición de equilibrio) y A la amplitud de la oscilación (elongación máxima).

5. Energía potencial electrostática

Ya sabes que cuando dos masas están cerca, se atraen por acción de una fuerza gravitatoria y tienden a acercarse. Como actúa una fuerza durante un determinado desplazamiento, se realiza un trabajo.

Algo similar sucede cuando son dos cargas las que interactúan, con la diferencia de que puede haber atracción o repulsión, según cuál sea el signo de las dos cargas.

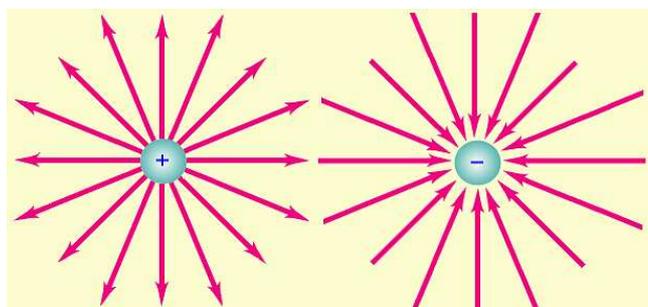
En estos casos de fuerzas centrales (gravitatorias o electrostáticas) surge una dificultad que no se ha tenido en cuenta, y es que **las fuerzas de interacción no son constantes**, ya que dependen de la distancia y esto supone que el tratamiento matemático para resolver la situación es más complejo, y no se realiza hasta la Física de 2º de Bachillerato.

El resultado obtenido para la energía potencial electrostática es:

$$E_{pe} = K \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

siendo q_1 y q_2 los valores de las dos cargas y r la distancia que las separa.

Si esa distancia es muy grande (tiende a infinito) las dos cargas no interactúan, y su energía potencial es nula. Si son cargas del mismo signo que están cerca, al liberarlas se repelen, disminuyendo su energía potencial al alejarse a la vez que aumenta la cinética. Y dado que **las interacciones electrostáticas también son conservativas**, la energía mecánica se conserva.



Potencial electrostático

De forma similar al caso de las interacciones gravitatorias, se puede definir el potencial electrostático como **la energía potencial electrostática por unidad de carga**. Si se considera que q_1 es la carga fija y q_2 la que estudiamos cómo interacciona:

$$V = \frac{E_{pe}}{q_2} = K \frac{q_1}{r}$$

Como la energía potencial se refiere por unidad de carga positiva ($q_2 = 1 \text{ C}$), su potencial tendrá el signo de q_1 . Fíjate en que si q_1 es positiva, la unidad de carga se desplazará por repulsión hacia afuera, desde una zona de mayor potencial a otra de menor, mientras que una carga negativa (un electrón por ejemplo) se movería justo al revés.

Hay que tener en cuenta que los potenciales son magnitudes escalares, y que se suman algebraicamente: si hay varias cargas que producen interacciones eléctricas, el potencial en un punto es la suma de los potenciales que crearían cada una de las cargas si estuvieran solas (**principio de superposición**).

Diferencia de potencial y trabajo

Si se tiene que desplazar la unidad de carga positiva desde un punto de potencial V_1 a otro de potencial V_2 , mayor que V_1 , es necesario realizar un trabajo que suponga ese aumento de energía, es decir, aplicar una fuerza F durante la distancia r que separa las cargas.